

Zelglistrasse 23
CH-5600 Lenzburg
Tel +41 62 550 10 25
www.friedlipartner.ch
info@friedlipartner.ch

Auftraggeberin: Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau

UNTERSUCHUNGSBERICHT

Folgeuntersuchung PCDD/F-Belastung in Böden rund um die KVA Turgi



Projektleitung: Leonard Zourek
Korreferat: Dr. Martin Hoffmann
Projekt-Nr.: 22.074.2.04

Lenzburg, 7. Juni 2023

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	4
1.1	Ausgangslage	4
1.2	Ausgeführte Arbeiten	5
1.3	Verwendete Unterlagen	5
2	UNTERSUCHUNG	6
2.1	Untersuchungskonzept	6
2.2	Probenahme	6
2.3	Laboranalytik	7
3	ERGEBNISSE	8
4	WEITERES VORGEHEN	9

ANHANG

Anhang 1	Liste Probenahmestandorte
Anhang 2	Plan Probenahmestandorte
Anhang 3	Belastungspäne
Anhang 4	Fotodokumentation
Anhang 5	Prüfbericht EMPA

VERTEILER

- Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau, Herr Thomas Muntwyler

1 EINLEITUNG

1.1 Ausgangslage

Ausgelöst durch das Bekanntwerden von Dioxine-belasteten Böden um die Kehrlichtverbrennungsanlage (KVA) von Lausanne im Sommer 2021 stellte sich die Frage, ob auch an weiteren Standorten in der Schweiz mit vergleichbaren Belastungen zu rechnen ist. Die Gefährdung durch Dioxine-Belastungen in Böden sollte daher auch rund um die drei KVA des Kantons Aargau (Buchs, Turgi und Oftringen) geprüft werden.

Dioxine-belastete Böden um KVAs

Die Abteilung für Umwelt (AfU) des Kantons Aargau beauftragte die FRIEDLIPARTNER AG mit der Untersuchung der Gehalte an polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) sowie dioxinähnlichen polychlorierten Biphenylen (dl-PCB)¹ und der Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer und Zink in Böden rund um die drei KVA.

Bisherige Untersuchung

Die durchgeführte Untersuchung [1] zeigte, dass die Probe von einer ackerbaulich genutzten Fläche (T.B01) im Osten der KVA einen PCDD/F-Gehalt von über 20 ng I-TEQ / kg aufwies. Im Rahmen des Projekts EMBO (Emittentenbezogene Bodenuntersuchungen im Kanton Aargau; [2], [3]) wurde bereits im Jahre 1997 an gleicher Stelle ein PCDD/F-Gehalt von 25 ng I-TEQ / kg festgestellt.

Der Wert von 20 ng I-TEQ / kg entspricht den Prüfwerten für Nutzungen mit direkter Bodenaufnahme, Nahrungspflanzenanbau sowie Futterpflanzenanbau gemäss Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo). Bei Gehalten über dem Prüfwert kann eine Gefährdung für Menschen, Tiere oder Pflanzen durch die Bodenbelastung bestehen.

Um die Ausdehnung des Bereiches mit Bodenbelastungen über 20 ng I-TEQ / kg zu ermitteln, beauftragte die AfU des Kantons Aargau die FRIEDLIPARTNER AG zunächst mit der Erarbeitung eines Untersuchungskonzepts [4] für die Folgeuntersuchung und anschliessend mit der Ausführung der Untersuchung gemäss diesem Konzept.

Auftrag

Der vorliegende Bericht beschreibt und beurteilt die Ergebnisse dieser Folgeuntersuchung und gibt Vorschläge für das weitere Vorgehen.

Inhalt Bericht

¹ In folgendem Bericht wird der Begriff "Dioxine" verwendet, um die Gesamtheit der PCDD/F zu bezeichnen.

1.2 Ausgeführte Arbeiten

FRIEDLIPARTNER AG, Zürich:

- Entnahme von 7 Bodenproben gemäss Konzept Folgeuntersuchung [4], Einweisen der Proben ins Labor
- Auswerten und Interpretieren der Messwerte
- Identifikation weiteren Handlungsbedarfs
- Erstellen des vorliegenden Berichts

Drittleistungen:

- Vorbereitung von 7 Boden-Proben gemäss VBBo durch die Niutec AG, Winterthur
- Chemische Untersuchung von 7 Boden-Proben durch die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf

1.3 Verwendete Unterlagen

- [1] Untersuchung PCDD/F-Belastung in Böden um KVA im Kanton Aargau. Untersuchungsbericht. Bericht FRIEDLIPARTNER AG vom 12. September 2022.
- [2] Emittentenbezogene Bodenuntersuchungen im Kanton Aargau. Projekt EMBO. Schlussbericht Phase 3. Bericht Niederer+Pozzi vom März 1997.
- [3] Emittentenbezogene Bodenuntersuchungen im Kanton Aargau. Projekt EMBO. Ergänzungsuntersuchungen KVA Turgi. Bericht Niederer+Pozzi vom Juli 1997
- [4] Untersuchung PCDD/F um KVA im Kanton Aargau, Konzept Folgeuntersuchung um die KVA Turgi. Untersuchungskonzept FRIEDLIPARTNER AG vom 20. Dezember 2022
- [5] Kehrlichtverbrennungsanlagen des Kantons Aargau. Bestimmung potentiell belasteter Gebiete in der Umgebung. Bericht ecolot GmbH vom März 2022.
- [6] Handbuch Probenahme und Probenvorbereitung für Schadstoffuntersuchungen in Böden. BAFU, 2003.
- [7] Wegleitung: Bestimmung von polychlorierten Dioxinen und Furanen in Böden. BAFU, 2001.
- [8] Handbuch Gefährdungsabschätzung und Massnahmen bei schadstoffbelasteten Böden, BUWAL, 2005.

2 UNTERSUCHUNG

2.1 Untersuchungskonzept

Die Modellierung der Immissionswahrscheinlichkeiten [5] wurde auch bei der Positionierung der Probenahmeflächen für die Folgeuntersuchung genutzt, um Bereiche zu identifizieren, in welchen erhöhte PCDD/F-Gehalte zu erwarten wären. Für die Auswahl der Probenahmeflächen galten im Weiteren folgende Grundsätze:

- Ausschluss von Flächen, welche anderweitig mit PCDD/F belastet sein könnten (Einträge im Kataster der belasteten Standorte (KbS) bzw. Prüfperimeter Bodenaushub (PBA))
- Ausschluss von Flächen, welche rekultiviert wurden oder in denen der Boden seit Inbetriebnahme der KVA ersetzt wurde (Meliorationen, Terrainveränderungen, etc.). Quellen: Verzeichnis Aufwertung Fruchtfolgeflächen, Prüfung alte Luftbilder und -Landeskarten
- Möglichst vollständige Anordnung der Proben in Transekten, um Konzentrationsgradienten sichtbar zu machen
- Berücksichtigung bereits vorhandener Daten aus der Hauptuntersuchung [1], um eine optimale Abdeckung des Untersuchungsgebiets sicherzustellen.

Die Tabelle in Anhang 1 und der Plan in Anhang 2 geben Details zur Lage der Probenahmestandorte (Koordinaten, Parzellennummer, Gemeinde), zu den Ergebnissen der Ausbreitungsmodellierung [5] sowie zur Lage der Probenahmestandorte der Hauptuntersuchung [1] wieder. Die Fotodokumentation in Anhang 4 gibt einen Eindruck von Lage und Nutzung an den Probenahmestandorten.

Lage
Probenahmestandorte

Zur Eingrenzung des Belastungsperimeters rund um die Fläche T.B01 [1] gegen Norden, Osten und Süden, wurden die Flächen T.F01 bis T.F07 untersucht.

In Absprache mit der AfU des Kantons Aargau wurde darauf verzichtet, den Wald am Ufer der Limmat (westlich der Fläche T.B01) zu untersuchen, da dort keine sensible/landwirtschaftliche Nutzung und somit keine Gefährdung zu erwarten ist. Als westliche Grenze des Belastungsperimeters kann die Strasse entlang des Waldrandes angenommen werden (vgl. Plan in Anhang 2).

2.2 Probenahme

Die Probenahme erfolgte gemäss BUWAL-Handbuch Probenahme [6]. Die Standortkoordinate aus dem Untersuchungskonzept wurde mittels GPS eingemessen und als Mittelpunkt einer 10 m x 10 m grossen Probenahmefläche definiert. Die Fläche wurde mit einem Massband ausgemessen und mit Weidezaunpfählen markiert. Mittels Hohlmeisselbohrern wurden jeweils 25 Einzelproben systematisch verteilt [6] entnommen und zu einer Flächenprobe vereinigt. Die Probenahmetiefe wurde, der VBBo entsprechend, auf 0 – 0.2 m ab OKT festgelegt.

Die Position der Probenahmestandorte wurde gegenüber dem Untersuchungskonzept [4] nicht verändert.

2.3 Laboranalytik

Die Proben wurden zum Analytiklabor der Niutec AG, Winterthur transportiert und dort gemäss Anhang 1 Ziffer 2 Absatz 4 der *Verordnung über Belastungen des Bodens* (VBBo) vorbereitet. Eine Teilmenge der vorbereiteten Proben wurde durch die Niutec AG ins Labor der EMPA geschickt. Probenvorbereitung

Die Bestimmung der Gehalte an PCDD/F, dl-PCB sowie PCB (=i-PCB) erfolgte gemäss BAFU-Wegleitung [7] mittels Soxhlet-Extraktion. Messmethoden

Nach Abschluss der Analysen sendete die Niutec AG eine Teilmenge der vorbereiteten Bodenproben ins Probenarchiv der Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau. Archivproben

3 ERGEBNISSE

Zur Ermittlung der Belastungskategorie des vorhandenen Bodens werden die Schadstoffgehalte der Bodenproben (siehe Analysenbericht in Anhang 5) in Tabelle 1 mit den Grenzwerten der VBBo verglichen. Gemäss VBBo werden zur Ermittlung der Bodenbelastung bzgl. PCDD/F die PCDD/F-Gehalte gewichtet nach Toxizitätsäquivalente des Internationalen Modells bezogen auf 2,3,7,8-TCDD (I-TEQ, exkl. Bestimmungsgrenze; vgl. Analysenbericht in Anhang 5) angewendet.

Tabelle 1: Schadstoffgehalte und Klassierung der Bodenproben

Probe	PCDD/F [ng I-TEQ / kg]	Nutzung
T.F01	17	Ackerbau / Kunstwiese
T.F02	14	Ackerbau / Kunstwiese
T.F03	22	Ackerbau / Kunstwiese
T.F04	21	Ackerbau / Kunstwiese
T.F05	16	Ackerbau / Kunstwiese
T.F06	24	Ackerbau / Kunstwiese
T.F07	12	Ackerbau / Kunstwiese
VBBo-Richtwert	5	
VBBo-Prüfwert	20	
VBBo-Sanierungswert	1'000 (Landwirtschaft und Gartenbau)	

Schadstoffgehalt > VBBo-Richtwert und < VBBo-Prüfwert

Schadstoffgehalt > VBBo-Prüfwert und < VBBo-Sanierungswert

Für die 7 untersuchten Proben ergaben sich folgende Analysenergebnisse bzgl. PCDD/F (vgl. Tabelle 1):

- In 4 Proben lagen die Gehalte zwischen dem VBBo-Richtwert und dem Prüfwert von 20 ng I-TEQ / kg für Pflanzenanbau
- In 3 Proben lagen die Gehalte über dem VBBo-Prüfwert, jedoch unter dem VBBo-Sanierungswert von 1'000 ng I-TEQ/kg für Landwirtschaft und Gartenbau.
- Der VBBo-Sanierungswert von 1'000 ng I-TEQ / kg (für Landwirtschaft und Gartenbau) wurde in keiner Probe überschritten.

In allen Proben wurden nur geringe Gehalte (max. 1.85 ng WHO-TEQ / kg) an dioxinähnlichen PCB (dl-PCB) festgestellt. Die Berücksichtigung der dl-PCB (und damit einhergehend die Verwendung der Toxizitätsäquivalenzfaktoren der WHO aus 2005) würde in keiner Probe zu einer Änderung der Belastungskategorie führen.

Die Pläne in Anhang 3 zeigen, dass die Ausdehnung des Perimeters mit Überschreitung des VBBo-Prüfwertes von 20 ng I-TEQ/kg nach Osten ("äussere" Probe T.F06: 24 ng I-TEQ/kg) und in geringerem Masse auch nach Norden nach Norden ("äussere" Probe T.F04: 21 ng I-TEQ/kg) nicht genau abgegrenzt werden konnte.

4 WEITERES VORGEHEN

Da der VBBo-Prüfwert für die betroffenen Nutzungen (Nahrungs-/Futterpflanzenanbau) in Teilen des Untersuchungsgebiets überschritten wurde, ist eine Gefährdung nicht ausgeschlossen. Daher muss die Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau für die betroffenen Böden eine Gefährdungsabschätzung nach Handbuch [8] durchführen und ggf. Nutzungseinschränkungen verfügen.

Gefährdungs-
abschätzung

Die Ausdehnung des Perimeters mit Überschreitung des VBBo-Prüfwertes von 20 ng I-TEQ/kg konnte nicht genau abgegrenzt werden. Eine genaue Abgrenzung wäre aber nur notwendig, wenn die Gefährdungsabschätzung einen Bedarf an Nutzungseinschränkungen ergäbe.

Vorerst keine weiteren
Untersuchungen

Wir empfehlen der Abteilung für Umwelt des Kantons Aargau, die im Rahmen der Haupt- und Folgeuntersuchungen identifizierten Gebiete mit PCDD/F-Gehalten über dem VBBo-Richtwert in den Prüfperimeter Bodenaushub (PBA) einzutragen, damit die PCDD/F-Belastung des Bodens im Fall von Bodenverschiebungen berücksichtigt wird.

Bereiche > Richtwert in
PBA eintragen

Geltungsbereich

Alle Arbeiten der FRIEDLIPARTNER AG wurden unter Einhaltung der Sorgfaltpflicht ausgeführt. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen im vorliegenden Bericht beruhen auf dem derzeitigen Kenntnisstand. Die FRIEDLIPARTNER AG übernimmt keine Haftung für die Folgen aus unbekanntem oder verschwiegenen Tatsachen. Die Ergebnisse gelten nur für das untersuchte Objekt und können nicht unüberprüft auf andere Objekte oder andere Verhältnisse übertragen werden.

Der vorliegende Bericht ist für den Auftraggeber und zu dessen ausschliesslicher Nutzung bestimmt. Er ist vertraulich und darf ohne Zustimmung des Auftraggebers weder kopiert noch an Dritte weitergegeben werden. Eine allfällige Haftung gegenüber Dritten, welche sich auf den vorliegenden Bericht berufen, wird ausdrücklich abgelehnt.

Lenzburg, 7. Juni 2023



Leonard Zourek
MSc ETH Umwelt-Natw.

Projektleiter



Martin Hoffmann
Dipl.-Chemiker, Dr. sc. ETH

Bereichsleiter Altlasten

P:\2022\22.074 Kanton Aargau AfU Dioxine um KVA\12 Berichte FP\Schlussbericht Folgeuntersuchung\Turgi\22.074 Folgeuntersuchung KVA Turgi.docx

ANHANG

Anhang 1	Liste Probenahmestandorte
Anhang 2	Pläne Probenahmestandorte
Anhang 3	Belastungspläne
Anhang 4	Fotodokumentation
Anhang 5	Prüfbericht EMPA

ANHANG 1

Liste Probenahmestandorte

Probenahmestellen rund um die KVA Turgi

Proben-ID	Nutzung	Parzelle	Gemeinde	X	Y	Probenahmetiefe (cm)
T.F01	Acker/Kunstwiese	417	Obersiggenthal	2662827	1259860	20
T.F02	Acker/Kunstwiese	419	Obersiggenthal	2662902	1259823	20
T.F03	Acker/Kunstwiese	414	Obersiggenthal	2662820	1259716	20
T.F04	Acker/Kunstwiese	428	Obersiggenthal	2662807	1259939	20
T.F05	Acker/Kunstwiese	422	Obersiggenthal	2663001	1259756	20
T.F06	Acker/Kunstwiese	410	Obersiggenthal	2663001	1259643	20
T.F07	Acker/Kunstwiese	413	Obersiggenthal	2662812	1259630	20

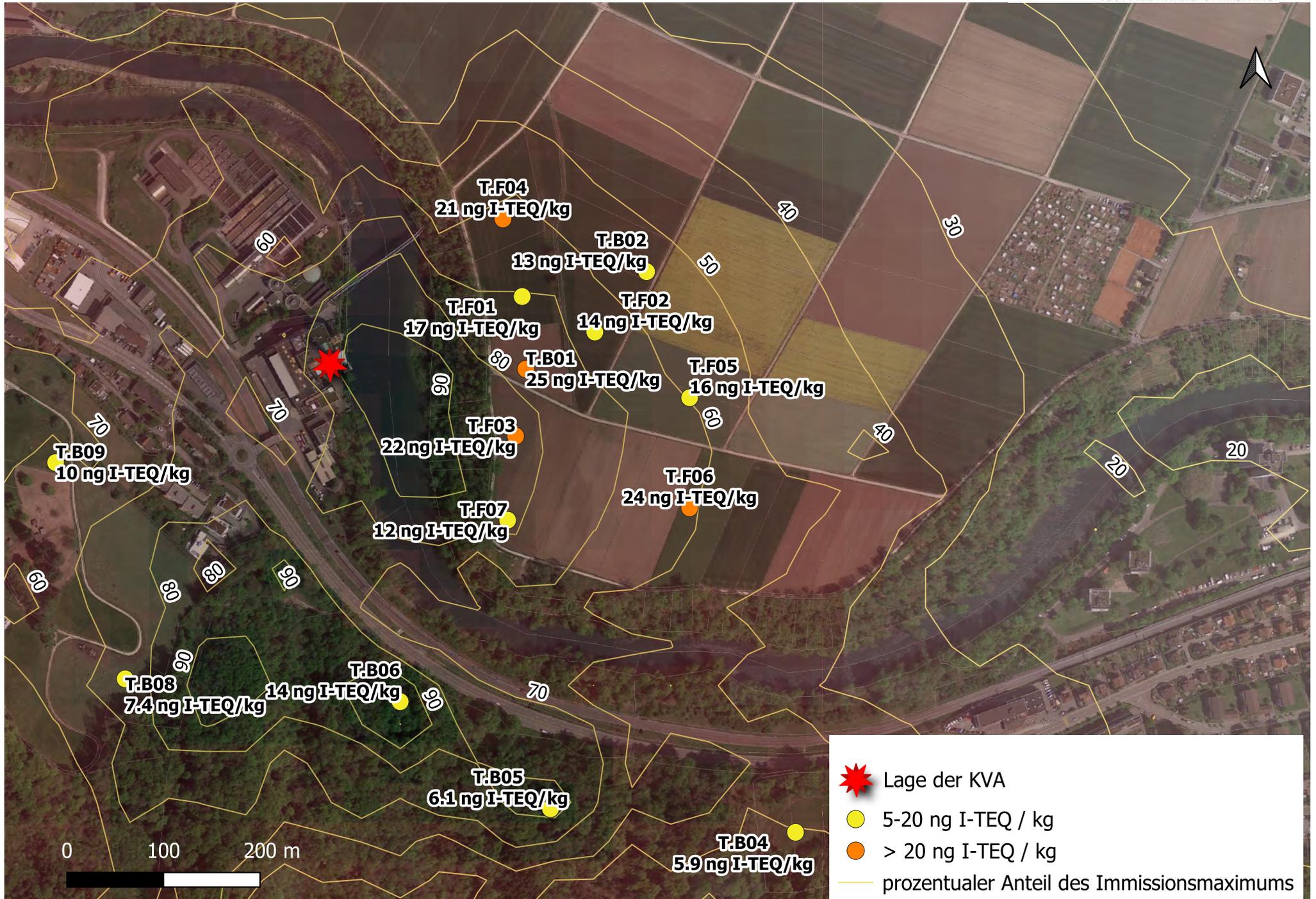
ANHANG 2

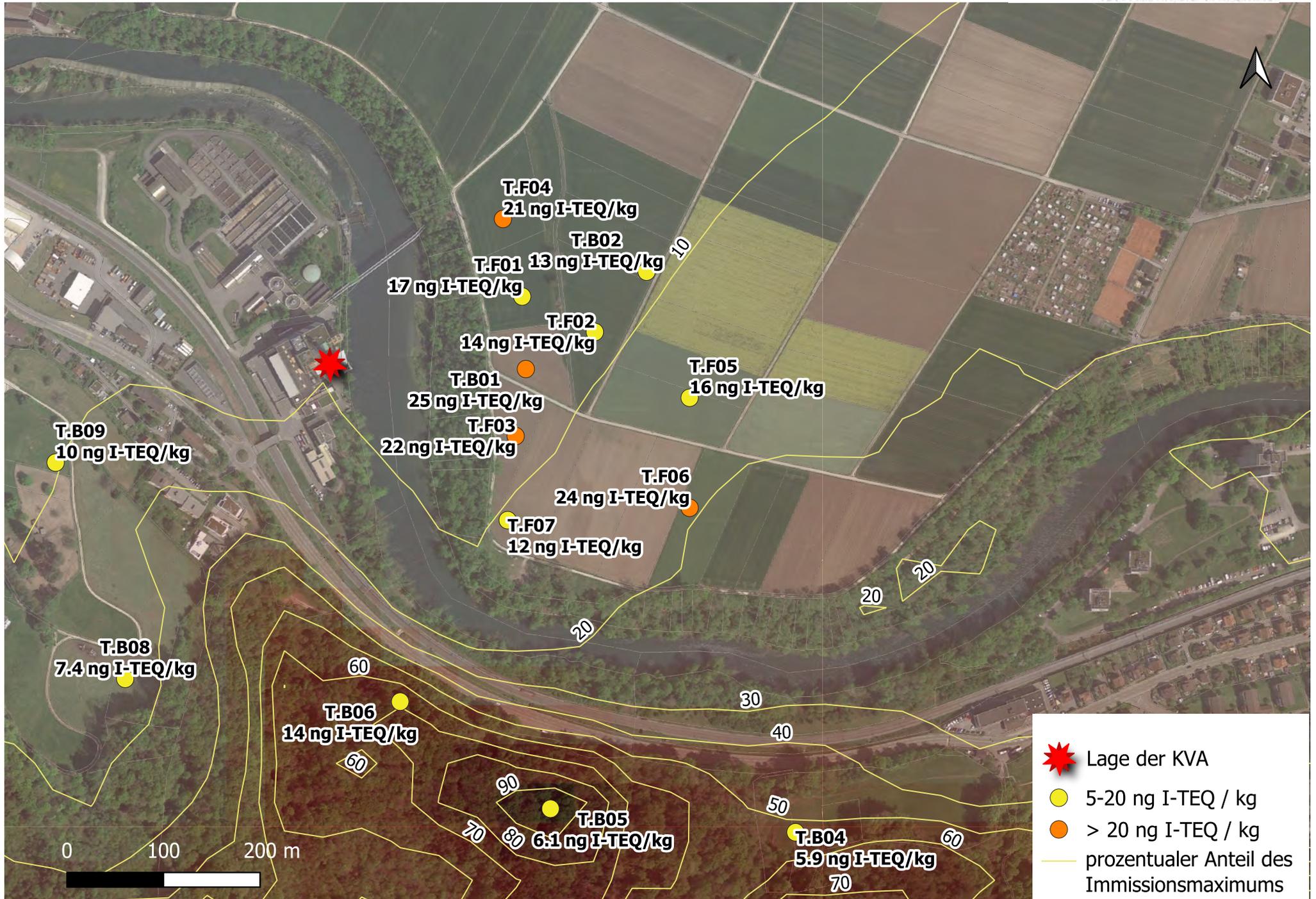
Plan Probenahmestandorte



ANHANG 3

Belastungspläne





ANHANG 4

Fotodokumentation



Probe Nr.: T.F01
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 17 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F02
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 14 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F03
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 22 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F04
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 21 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F05
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 16 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F06
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 24 ng I-TEQ / kg



Probe Nr.: T.F07
Gemeinde: Obersiggenthal
Nutzung: Ackerbau / Kunstwiese
PCDD/F 12 ng I-TEQ / kg

ANHANG 5

Prüfbericht EMPA

Herr
Leonard Zourek
Friedlipartner AG
Nansenstrasse 5
8050 Zürich

Prüfbericht Nr. 5214031852

Projektauftrag:	Quantitative Bestimmung von polychlorierten Dibenzo-<i>p</i>-dioxinen (PCDD), polychlorierten Dibenzofuranen (PCDF), und polychlorierten Biphenylen (PCB) in Bodenproben mittels GC-HRMS
Auftraggeber:	Friedlipartner AG
Prüfobjekte:	7 Bodenproben KVA Turgi (Proben T.F01-T.F07)
Kundenreferenz:	Leonard Zourek
Ihr Auftrag vom:	9. März 2023
Eingang der Prüfobjekte:	11. April 2023
Ausführung der Prüfung:	11. April bis 5. Mai 2023
Anzahl Seiten:	-13-
Beilagen:	Rechnung

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Dübendorf, 16. Mai 2023

Prüfleiter:
Markus Zennegg

Abteilungsleiter:
PD Dr. Davide Bleiner

1 Prüfobjekte

Am 11. April 2023 wurden total 7 Bodenproben aus dem Kanton AG, der Empa, Abteilung Advanced Analytical Technologies per Post überbracht. Je Probe wurden rund 500g vorbereiteter Boden zur Analyse geliefert. Die Vorbereitung der Bodenproben erfolgte durch die Firma Niutec (Labor für Industrie und Umwelt, Oberwinterthur). Angaben zu den Probenbezeichnungen können der Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Probenbezeichnungen gemäss dem Auftraggeber und Empa-interne Nummerierung

Niutec-Nr:	Proben-ID:	Tiefe in cm:	Empa-Int. Nr.:
23.0412_010	T.F01	0 – 20	13423
23.0412_011	T.F02	0 – 20	13523
23.0412_012	T.F03	0 – 20	13623
23.0412_013	T.F04	0 – 20	13723
23.0412_014	T.F05	0 – 20	13823
23.0412_015	T.F06	0 – 20	13923
23.0412_016	T.F07	0 – 20	14023

2 Probenaufarbeitung

2.1 Extraktion

Jeweils 100g der getrockneten und gesiebten Bodenprobe wurden in einer Wolframcarbid-Schwingmühle für 30 Sekunden fein gemahlen. Von der gemahlene Probe wurden 20 bis 25 Gramm zur Extraktion, in eine vorextrahierte Cellulosehülle, eingewogen. Die Extraktion erfolgte mit Toluol, während 24 Stunden (>200 Zyklen), in einer Soxhletapparatur. Als interne Standards wurden $^{13}\text{C}_{12}$ isotopenmarkierte PCDD/F, i-PCB und dl-PCB Kongenerenmischungen zudosiert, deren Zusammensetzung ist im Abschnitt 3 beschrieben.

2.2 Probenaufreinigung der PCDD/F und PCB

Nach beendeter Extraktion wurde der Toluolextrakt am Rotationsverdampfer bei 70 mbar und 50°C bis auf 1 mL aufkonzentriert. Nach Zugabe von rund 5 mL n-Hexan erfolgte die chromatographische Reinigung und Fraktionierung an vier verschiedenen Festphasen die seriel verbunden waren (1. saures Kieselgel, 2. basisches Kieselgel; 3. Aktivkohle, 4. basisches Aluminiumoxid). Dieser Schritt erfolgte auf dem Probenaufreinigungssystem EZprep der Firma FMS. Hierbei wurden zwei Fraktionen erhalten (F1 mit den i-PCB und acht dl-PCB; F2 mit den PCDD/F und vier dl-PCB). Die beiden Fraktionen wurden am Rotationsverdampfer bis auf ca. 1 mL aufkonzentriert und danach unter Begasung mit Stickstoff auf ca. 30 µL eingengt. Nach Zugabe der $^{13}\text{C}_{12}$ isotopenmarkierten Recoverystandards (siehe Abschnitt 3) erfolgte die quantitative Bestimmung der PCDD/F, i-PCB und dl-PCB mittels Gaschromatographie-Massenspektrometrie (GC-MS). Die Messung der PCB erfolgte auf einem Q-Exactive Orbitrap GC-HRMS im hochaufgelösten Fullscan bei einer Massenauflösung von 60'000 und einer Massengenauigkeit von 1 ppm (!). Die PCDD/F wurden auf dem sehr nachweisstarken APGC Xevo TQ-XS von Waters im Tochterionen-Scan (MS/MS) bestimmt.

3 Zur Quantifizierung und Kalibration verwendete Standards

3.1 Referenzmaterialien PCDD/F und PCB

Kalibrationsstandard:	Mischung aller 2,3,7,8-chlorsubstituierten PCDD und PCDF (EDF-7999, Precision and Recovery Standard, Cambridge Isotope Laboratories) Mischung der PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189 (C-WHO-01, Accu Standards Inc.) Mischung der PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180 (AE-00059, Accu Standards Inc.)
Wiederfindungsstandard:	$^{13}\text{C}_{12}$ -1,2,7,8-TetraCDF (EF-1438, Cambridge Isotope Laboratories) $^{13}\text{C}_{12}$ -PCB 70 (EC-4914, Cambridge Isotope Laboratories)
Interner Standard:	Mischung aller 17 $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkierten 2,3,7,8-chlorsubstituierten PCDD und PCDF (DF-LCS-C, Wellington Laboratories) Mischung der $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkierten PCB 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189 (WP-LCS, Wellington Laboratories) Mischung der $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkierten PCB 28, 52, 101, 138, 153, 180 (EC 4058, Cambridge Isotope Laboratories)

4 Eingesetzte Prüfmittel und Prüfbedingungen

4.1 Prüfmittel PCDD/F

Gaschromatograph:	Agilent 7890B mit Autosampler Agilent 7693A
Kapillarsäule PCDD/Fs:	Restek Rtx-Dioxin2 60m x 0.25mm dia x 0.25 μm Film
Massenspektrometer:	Waters Xevo TQ-XS APGC v2.0

4.2 Prüfbedingungen PCDD/F

Trärgas:	Helium, 1.4 ml/min.
Injektion:	1 μL splitlos
Temperaturprogramm:	100°C (1 min), 20°C min ⁻¹ bis 220°C, 3°C min ⁻¹ bis 300°C (20 min)
Quellentemperatur:	150°C
Ionisierung:	APGC Corona Pin 2 μA , Charge Transfer, positive Ionen
Elektronenenergie:	20 eV
Massenauflösung:	Einheitsauflösung
MS-MS Detektion:	Es wurde jeweils die beiden häufigsten Isotopenkombinationen der nativen und $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten PCDD/F im Tochterionen-Scan (MS-MS) detektiert (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Selektierte und detektierte m/z-Werte der PCDD/F (Mutterion und Tochterion)

PCDD/F	nativ		¹³ C ₁₂ -markiert	
	m/z	m/z	m/z	m/z
TeCDF Mutterion	303.9000	305.9000	315.9400	317.9400
TeCDF Tochterion	240.9400	242.9300	251.9700	253.9700
TeCDD Mutterion	319.9000	321.8900	331.9400	333.9300
TeCDD Tochterion	256.9300	258.9300	267.9700	269.9700
PeCDF Mutterion	337.8600	339.8600	349.9000	351.9000
PeCDF Tochterion	274.9000	276.9000	285.9400	287.9300
PeCDD Mutterion	353.8600	358.8600	365.9000	367.8900
PeCDD Tochterion	290.8900	292.8900	301.9300	303.9300
HxCDF Mutterion	373.8200	375.8200	385.8600	387.8600
HxCDF Tochterion	310.8600	312.8500	321.8900	323.8900
HxCDD Mutterion	389.8200	391.8100	401.8600	403.8500
HxCDD Tochterion	326.8500	328.8500	337.8900	339.8900
HpCDF Mutterion	407.7800	409.7800	419.8200	421.8200
HpCDF Tochterion	344.8200	346.8200	355.8500	357.8500
HpCDD Mutterion	423.7800	425.7800	435.8200	437.8100
HpCDD Tochterion	360.8100	362.8100	371.8500	373.8500
OCDF Mutterion	441.7400	443.400	453.7800	455.7800
OCDF Tochterion	378.7800	380.7800	389.8200	391.8100
OCDD Mutterion	457.7400	459.7300	469.7800	471.7800
OCDD Tochterion	394.7700	396.7700	405.8100	407.8100

4.3 Prüfmittel PCB

Gaschromatograph:	Thermo Scientific Trace GC 1310 mit Autosampler TriPlus RSH
Kapillarsäule:	30m × 0.25 mm TG5-SilMS, Filmdicke 0.25 µm
Massenspektrometer:	Q-Exactive Orbitrap GC/HRMS , ausgerüstet mit Systemsteuerungs- und Applikationssoftware Exactive Series 2.8 SP1, Xcalibur 4.0

4.4 Prüfbedingungen PCB

Trägergas:	Helium, konstanter Fluss 1.5 ml min ⁻¹
Injektion:	1 µL splitlos bei 260°C
Temperaturprogramm:	100°C (1 min), 20°C min ⁻¹ bis 180°C, 5°C min ⁻¹ bis 300°C (6 min.)
Quellentemperatur:	250°C
Ionisierung:	Elektronenstoss (EI), Detektion der positiven Ionen
Elektronenenergie:	70 eV
Massenauflösung:	m/Δm = 60'000 (bei m/z 200, FWHH)
Einzelionendetektion:	Es wurden jeweils die m/z-Werte zwischen 180 und 500 im hochauflösenden Fullscanmodus registriert und die beiden häufigsten Isotopenkombinationen der nativen und ¹³ C ₁₂ -markierten PCB im Molekülionencluster für die quantitative Auswertung verwendet (siehe Tabelle 3)

Tabelle 3: Gemessene m/z-Werte der PCB (Massengenauigkeit 1 ppm)

PCB	native		¹³ C ₁₂ -labeled	
	m/z	m/z	m/z	m/z
TriCB	255.9608	257.9578	268.0010	269.9981
TeCB	289.9223	291.9148	301.9626	303.9597
PeCB	325.8805	327.8776	337.9207	339.9178
HxCB	359.8415	361.8386	371.8817	373.8789
HpCB	393.8025	395.7996	405.8428	407.8398

5. Zusammenfassung der Resultate

Die Resultate zu den PCDD/F, dl-PCB und i-PCB sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst. Die Konzentrationen sind in ng/kg Trockensubstanz (TS) aufgeführt. Rote und unterstrichene Werte entsprechen der Nachweisgrenze. Diese wurde als das 5-fache Untergrundrauschen definiert und berechnet. Summe I-TEQ_{max.} oder WHO-TEQ_{max.} = Upper bound (nicht nachgewiesene Kongenere werden mit der Nachweisgrenze in die Berechnung miteinbezogen). Summe I-TEQ_{min.} oder WHO-TEQ_{min.} = Lower bound (nur nachgewiesene Kongenere werden in die Berechnung miteinbezogen)

5.1 PCDD/F WHO-TEQ bzw. I-TEQ sowie dl-PCB WHO-TEQ in den Bodenproben

Tabelle 4: Resultate zu den WHO-TEQ_{min.}, I-TEQ_{min.}, sowie i-PCB in den Bodenproben in ng/kg TS

Proben-ID	PCDD/F WHO- TEQ _{min}	PCDD/F I-TEQ min	dl-PCB WHO- TEQ _{min}	Total WHO- TEQ _{min}	Σ 6 i-PCB	Σ 7 i-PCB
T.F01	17.61	16.87	1.15	18.77	4844	5083
T.F02	14.74	14.04	0.73	15.47	2875	3102
T.F03	23.30	21.84	1.04	24.35	2421	2810
T.F04	22.11	20.65	1.35	23.46	6486	7074
T.F05	17.79	16.47	1.10	18.89	4964	5406
T.F06	25.66	24.13	1.85	27.51	9883	10767
T.F07	12.12	11.84	0.71	12.83	2334	2497

Σ 6 i-PCB = PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180 / Σ 7 i-PCB = PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180 plus dl-PCB 118

6. Detaillierte kongenerenspezifische Resultate zu den PCDD/F, dl-PCB und i-PCB

6.1 Detaillierte Resultate zu den Konzentrationen der PCDD/F in den Bodenproben

Tabelle 5: PCDD/F Konzentrationen in den Bodenproben in ng/kg TS

Proben-ID:	T.F01	T.F02	T.F03	T.F04	T.F05	T.F06	T.F07
Interne-Nr.:	13423	13523	13623	13723	13823	13923	14023
Niutec-Nr.:	23.0412_10	23.0412_11	23.0412_12	23.0412_13	23.0412_14	23.0412_15	23.0412_16
2,3,7,8-TCDD	0.53	0.58	0.76	0.78	0.65	1.1	0.53
1,2,3,7,8-PeCDD	5.0	4.2	7.3	7.2	5.9	7.6	3.4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	7.6	4.8	8.8	7.9	6.3	11	4.9
1,2,3,6,7,8-HxCDD	10	9.1	18	13	14	18	8.9
1,2,3,7,8,9-HxCDD	10	8.3	11	12	12	18	6.4
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	201	136	202	224	136	241	101
OCDD	482	308	672	632	475	700	329
2,3,7,8-TCDF	4.1	2.8	4.1	4.0	2.2	4.3	2.1
1,2,3,7,8-PeCDF	4.1	5.2	5.6	4.9	3.9	7.3	3.4
2,3,4,7,8-PeCDF	6.4	5.3	7.9	7.8	5.9	7.9	5.6
1,2,3,4,7,8-HxCDF	8.4	7.8	11.0	10	7.5	12	6.0
1,2,3,6,7,8-HxCDF	9.1	8.4	15	11	11	14	7.2
1,2,3,7,8,9-HxCDF	2.7	2.3	4.4	3.2	2.5	3.5	1.6
2,3,4,6,7,8-HxCDF	18	16	19	21	15	25	9.2
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	72	69	127	92	79	119	58
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	8.8	5.0	10.7	6.9	6.2	9.7	4.4
OCDF	59	39	72	60	48	74	36

6.2 Detaillierte Resultate zum PCDD/F WHO-TEQ in den Bodenproben

Tabelle 6: PCDD/F WHO-TEQ₂₀₀₅ in den Bodenproben in ng/kg TS (Summenwert auf zwei signifikante Stellen gerundet)

Proben-ID:	T.F01	T.F02	T.F03	T.F04	T.F05	T.F06	T.F07
Interne-Nr.:	13423	13523	13623	13723	13823	13923	14023
Niutec-Nr.:	23.0412_10	23.0412_11	23.0412_12	23.0412_13	23.0412_14	23.0412_15	23.0412_16
2,3,7,8-TCDD	0.53	0.58	0.76	0.78	0.65	1.1	0.53
1,2,3,7,8-PeCDD	5.0	4.2	7.3	7.18	5.9	7.6	3.4
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.76	0.48	0.88	0.79	0.63	1.1	0.49
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.0	0.91	1.8	1.3	1.4	1.8	0.89
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1.0	0.83	1.1	1.2	1.2	1.8	0.64
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	2.0	1.4	2.0	2.2	1.4	2.4	1.0
OCDD	0.14	0.092	0.20	0.19	0.14	0.21	0.099
2,3,7,8-TCDF	0.41	0.28	0.41	0.40	0.22	0.43	0.21
1,2,3,7,8-PeCDF	0.12	0.16	0.17	0.15	0.12	0.22	0.10
2,3,4,7,8-PeCDF	1.9	1.6	2.4	2.3	1.8	2.4	1.7
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.84	0.78	1.1	1.0	0.75	1.2	0.60
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.91	0.84	1.5	1.1	1.1	1.4	0.72
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.27	0.23	0.44	0.32	0.25	0.35	0.16
2,3,4,6,7,8-HxCDF	1.8	1.6	1.9	2.1	1.5	2.5	0.92
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.72	0.69	1.3	0.92	0.79	1.2	0.58
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.088	0.050	0.11	0.069	0.062	0.097	0.044
OCDF	0.018	0.012	0.022	0.018	0.014	0.022	0.011
Σ WHO-TEQ max. (PCDD/PCDF)	18	15	23	22	18	26	12
Σ WHO-TEQ min. (PCDD/PCDF)	18	15	23	22	18	26	12

6.3 Detaillierte Resultate zum PCDD/F I-TEQ in den Bodenproben

Tabelle 7: PCDD/F I-TEQ in den Bodenproben in ng/kg TS (Summenwert auf zwei signifikante Stellen gerundet)

Proben-ID:	T.F01	T.F02	T.F03	T.F04	T.F05	T.F06	T.F07
Interne-Nr.:	13423	13523	13623	13723	13823	13923	14023
Niutec-Nr.:	23.0412_10	23.0412_11	23.0412_12	23.0412_13	23.0412_14	23.0412_15	23.0412_16
2,3,7,8-TCDD	0.53	0.58	0.76	0.78	0.65	1.1	0.53
1,2,3,7,8-PeCDD	2.5	2.1	3.7	3.6	2.9	3.8	1.7
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.76	0.48	0.88	0.79	0.63	1.1	0.49
1,2,3,6,7,8-HxCDD	1.0	0.91	1.8	1.3	1.4	1.8	0.89
1,2,3,7,8,9-HxCDD	1.0	0.83	1.1	1.2	1.2	1.8	0.64
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	2.0	1.4	2.0	2.2	1.4	2.4	1.0
OCDD	0.48	0.31	0.67	0.63	0.48	0.70	0.33
2,3,7,8-TCDF	0.41	0.28	0.41	0.40	0.22	0.43	0.21
1,2,3,7,8-PeCDF	0.21	0.26	0.28	0.24	0.20	0.36	0.17
2,3,4,7,8-PeCDF	3.2	2.7	3.9	3.9	2.9	4.0	2.8
1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.84	0.78	1.1	1.0	0.75	1.2	0.60
1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.91	0.84	1.5	1.1	1.1	1.4	0.72
1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.27	0.23	0.44	0.32	0.25	0.35	0.16
2,3,4,6,7,8-HxCDF	1.8	1.6	1.9	2.1	1.5	2.5	0.92
1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.72	0.69	1.3	0.92	0.79	1.2	0.58
1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.088	0.050	0.11	0.069	0.062	0.10	0.044
OCDF	0.059	0.039	0.072	0.060	0.048	0.074	0.036
Σ I-TEQ max. (PCDD/PCDF)	17	14	22	21	16	24	12
Σ I-TEQ min. (PCDD/PCDF)	17	14	22	21	16	24	12

6.4 Detaillierte Resultate zu i-PCB und dl-PCB in den Bodenproben

Tabelle 8: i-PCB und dl-PCB Konzentrationen in den Bodenproben in ng/kg TS

Proben-ID:	T.F01	T.F02	T.F03	T.F04	T.F05	T.F06	T.F07
Interne-Nr.:	13423	13523	13623	13723	13823	13923	14023
Niutec-Nr.:	23.0412_10	23.0412_11	23.0412_12	23.0412_13	23.0412_14	23.0412_15	23.0412_16
PCB 28	50	38	60	76	63	100	33
PCB 52	60	39	72	54	54	132	34
PCB 101	290	150	220	275	292	479	130
PCB 138	1578	986	728	2363	1651	3476	797
PCB 153	1992	1130	947	2672	2038	3930	918
PCB 180	874	532	393	1046	866	1767	422
Σ 6 i-PCB:	4844	2875	2421	6486	4964	9883	2334
Σ 6 i-PCB + PCB 118:	5083	3102	2810	7074	5406	10767	2497
PCB 77	14	11	29	22	19	48	10
PCB 81	1.2	0.69	1.7	1.2	0.97	1.9	0.71
PCB 105	118	113	223	324	182	469	93
PCB 114	1.6	1.5	4.0	2.4	2.1	4.9	1.9
PCB 118	239	228	389	588	442	883	164
PCB 123	6.7	8.7	15	25	16	36	7.8
PCB 126	10	6.6	9.3	12	10	17	6.4
PCB 156	119	80	66	162	123	250	68
PCB 157	31	20	21	57	41	73	19
PCB 167	76	51	45	137	90	181	44
PCB 169	3.3	1.7	2.8	3.1	2.0	3.4	1.9
PCB 189	25	17	12	35	24	56	13

Σ 6 i-PCB = PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180 / Σ 7 i-PCB = PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180 plus dl-PCB 118

6.5 Detaillierte Resultate zum dl-PCB WHO-TEQ in den Bodenproben

Tabelle 9: dl-PCB WHO-TEQ₂₀₀₅ in den Bodenproben in ng/kg TS (Summenwert auf zwei signifikante Stellen gerundet)

	T.F01	T.F02	T.F03	T.F04	T.F05	T.F06	T.F07
Interne-Nr.	13423	13523	13623	13723	13823	13923	14023
Probenbezeichnung	23.0412_10	23.0412_11	23.0412_12	23.0412_13	23.0412_14	23.0412_15	23.0412_16
PCB 77	0.0014	0.0011	0.0029	0.0022	0.0019	0.0048	0.0010
PCB 81	0.00036	0.00021	0.00050	0.00037	0.00029	0.00057	0.00021
PCB 105	0.0035	0.0034	0.0067	0.0097	0.0054	0.014	0.0028
PCB 114	0.000048	0.000044	0.00012	0.000072	0.000063	0.00015	0.000057
PCB 118	0.0072	0.0068	0.012	0.018	0.013	0.026	0.0049
PCB 123	0.00020	0.00026	0.00045	0.00076	0.00047	0.0011	0.00023
PCB 126	1.0	0.66	0.93	1.2	1.0	1.7	0.64
PCB 156	0.0036	0.0024	0.0020	0.0049	0.0037	0.0075	0.0020
PCB 157	0.00092	0.00061	0.00064	0.0017	0.0012	0.0022	0.00058
PCB 167	0.0023	0.0015	0.0014	0.0041	0.0027	0.0054	0.0013
PCB 169	0.098	0.050	0.083	0.093	0.061	0.10	0.057
PCB 189	0.00074	0.00050	0.00037	0.0010	0.00072	0.0017	0.00040
Σ WHO-TEQ max.	1.2	0.73	1.0	1.3	1.1	1.8	0.71
Σ WHO-TEQ min.	1.2	0.73	1.0	1.3	1.1	1.8	0.71

7 Allgemeine Angaben

7.1 Messunsicherheit und Nachweisgrenzen

Die quantitative Auswertung der GC-MS-Messungen erfolgte über die Signalflächen oder Signalhöhen in den Einzelionenchromatogrammen. Die Messunsicherheit beträgt erfahrungsgemäss für die PCDD/F und PCB ca. 20 %. Nachweisgrenzen wurden wo möglich auf der Basis $\text{Signal/Rauschen} = 5$ berechnet.

7.2 Glaswaren und Chemikalien

Alle verwendeten Glaswaren wurden maschinell mit einem stark basischen Detergent gereinigt (RBS-50) und danach über Nacht bei 450°C ausgeheizt. Vor Gebrauch wurden sie zusätzlich mit reinstem Lösemittel (n-Hexan, Dichlormethan oder Toluol) vorgespült. Die verwendeten Chemikalien waren von einem Reinheitsgrad speziell für die Ultrapurenanalytik von Dioxinen bzw. PCBs.

7.3 Toxizitätsäquivalente und Upper-Bound vs Lower-Bound

Der TEQ-Wert einer Probe errechnet sich, indem die jeweilige dl-PCB oder PCDD/F Kongenerenkonzentration mit dem dazugehörigen Toxizitätsäquivalenzfaktor (WHO-TEF oder I-TEF, Tabelle 10 – 12) multipliziert und die so erhaltenen Produkte addiert werden. Für die Berechnung des Upper-Bound (WHO-TEQmax. oder I-TEQmax.) wurden, für nicht nachgewiesene Kongenere der dl-PCB bzw. PCDD/F, die Nachweisgrenze eingesetzt. Im Falle des Lower-Bound (WHO-TEQmin. oder I-TEQmin.) wurden nur nachgewiesene Kongenere in die Berechnung miteinbezogen.

Tabelle 10: WHO Toxizitätsäquivalenzfaktoren für dl-PCB (WHO-TEF, 2005)

Nonortho-PCB	WHO-TEF	Monoortho-PCB	WHO-TEF
77	0.0001	105	0.00003
81	0.0003	114	0.00003
126	0.1	118	0.00003
169	0.03	123	0.00003
		156	0.00003
		157	0.00003
		167	0.00003
		189	0.00003

Tabelle 11: WHO Toxizitätsäquivalenzfaktoren für PCDD/F (WHO-TEF, 2005)

PCDD	WHO-TEF	PCDF	WHO-TEF
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0.1
1,2,3,7,8-PeCDD	1	1,2,3,7,8-PeCDF	0.03
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	2,3,4,7,8-PeCDF	0.3
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
OCDD	0.0003	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
		1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01
		OCDF	0.0003

Tabelle 12: Internationale Toxizitätsäquivalenzfaktoren für PCDD/F (I-TEF)

PCDD	WHO-TEF	PCDF	WHO-TEF
2,3,7,8-TCDD	1	2,3,7,8-TCDF	0.1
1,2,3,7,8-PeCDD	0.5	1,2,3,7,8-PeCDF	0.05
1,2,3,4,7,8-HxCDD	0.1	2,3,4,7,8-PeCDF	0.5
1,2,3,6,7,8-HxCDD	0.1	1,2,3,4,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,7,8,9-HxCDD	0.1	1,2,3,6,7,8-HxCDF	0.1
1,2,3,4,6,7,8-HpCDD	0.01	1,2,3,7,8,9-HxCDF	0.1
OCDD	0.001	2,3,4,6,7,8-HxCDF	0.1
		1,2,3,4,6,7,8-HpCDF	0.01
		1,2,3,4,7,8,9-HpCDF	0.01
		OCDF	0.001

7.4 Verwendete Abkürzungen

PCB	Polychlorierte Biphenyle
dl-PCB	Dioxin-Like PCB (dioxinähnliche PCB)
TriCB	Trichlorbiphenyl
TeCB	Tetrachlorbiphenyl
PeCB	Pentachlorbiphenyl
HxCB	Hexachlorbiphenyl
HpCB	Heptachlorbiphenyl
PCDD	Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzo- <i>p</i> -dioxine
TeCDD	Tetrachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin
TeCDF	Tetrachlordibenzofuran
PeCDD	Pentachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin
PeCDF	Pentachlordibenzofuran
HxCDD	Hexachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin
HxCDF	Hexachlordibenzofuran
HpCDD	Heptachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin
HpCDF	Heptachlordibenzofuran
OCDD	Octachlordibenzo- <i>p</i> -dioxin
OCDF	Octachlordibenzofuran
WHO-TEF	WHO 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalenzfaktor
WHO-TEQ	WHO 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalent
I-TEF	Internationaler 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalenzfaktor
I-TEQ	Internationales 2,3,7,8-TCDD-Toxizitätsäquivalent
TS	Trockensubstanz
GC-MS	Gaschromatographie-Massenspektrometrie
GC-HRMS	Gaschromatographie-Hochaufgelöste-Massenspektrometrie (High Resolution)
ng	Nanogramm (1 ng = 1 x 10 ⁻⁹ g = 0.000'000'001 g)
pg	Pikogramm (1 pg = 1 x 10 ⁻¹² g = 0.000'000'000'001 g)
fg	Femtogramm (1 fg = 1 x 10 ⁻¹⁵ g = 0.000'000'000'000'001 g)